

新型扫描近场微波显微术*

高 琛

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230026)

项 晓 东

(劳伦斯伯克利国家实验室材料科学部 伯克利 美国)

吴 自 勤

(中国科学技术大学天文与应用物理系 合肥 230026)

摘 要 简要回顾了近场显微术,特别是扫描近场微波显微术的发展历史;简要介绍了一种新型扫描近场微波显微镜的结构、工作原理以及相应的微波近场显微理论;介绍了它在超导材料、铁电材料、高密度存储技术研究中的应用.

关键词 近场微波显微术,隐失波

NOVEL SCANNING TIP MICROWAVE NEAR-FIELD MICROSCOPY

Gao Chen

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Xiang Xiaodong

(Materials Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley)

Wu Ziqin

(Department of Astronomy and Applied Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Abstract The history of near-field microscopy, especially the history of scanning tip microwave near-field microscopy is briefly reviewed. The structure, principle of operation, and the relevant theory of a novel scanning tip microwave near-field microscope are described, as well as applications in studies of superconducting materials, ferroelectrics and high density data storage.

Key words scanning tip microwave near-field microscopy, evanescent wave

1 历史回顾

所有的显微术都是将某种形式的波动作用于物体,然后通过探测被物体调制的、并负载了物体信息的载波来重构物体某一物理性质的空间分布.传统的显微术,如光学显微镜都属于远场显微术.远场显微术的最大特点是:源、物和探测器之间的距离远大于波长.由于相互之间都在远场,成像的3个环节:波的发射、波与物体的相互作用和载波的探测是相互独立的,

或者说物体的存在并不会影响到源的发射,而载波的探测也不会影响到波与物体的相互作用.在这样的系统中,能量或信息的流动是单向的.

经过长期的发展,各种远场显微术,包括相应的成像理论都已趋成熟,并构成了一个较为完整的体系,在科学技术的进步中扮演了不可或缺的角色.然而,远场显微术的分辨能力受波动衍射极限的制约,对小于 $1/2$ 波长的细节,远

* 1998-03-30收到初稿,1999-05-24修回

场显微术无能为力.这也正是人们致力于发展各种短波显微术,如电子显微镜、软 X 射线显微镜的原因所在.这个极限一度曾被认为是不可逾越的.沿用傅里叶光学中空间频率的概念,要想再现某一尺度的物体,必须用与其尺度相当或更高频率的波与之作用并接收到相应空间频率的载波.空间频率作为一种被载波是调制在负载波上的.由于负载波无法携带高于其自身频率的被载波,所以分辨率是有极限的.

事实上,早在 1928 年, Syngge^[1]就已意识到高于负载波频率的被载波虽然不能传播,但却是在存在的,只不过被限制在距离光源或物体表面大约波长尺度的范围内,这就是所谓的隐失波(evanescent wave).原则上讲,如果能接收到足够高空间频率的隐失波,分辨率是没有极限的.在此基础上, Syngge 预言,用比波长更小的点源在足够近的距离内照明物体,或用比波长更小的点探测器在足够近的距离内探测物体的散射波,分辨率可以突破衍射极限.进入 80 年代以后,当技术的进步终于能够提供上述条件时,以扫描近场光学显微镜为代表的近代显微术也就由设想变成了现实,并在较短的时间里取得了长足的进展.具体表现为不仅突破了衍射极限,而且还开辟了如纳米光学、超高密度存储等一系列新的研究领域.由于显微术本身是一门跨学科的,应用遍及物理、化学、生物、医学、信息、材料、微电子、精密机械等的综合学科,其巨大的应用前景已经并且正在带动新的高科技产业的兴起.

2 新型扫描近场微波显微镜的发展和构造

近场微波显微术同近场光学显微术有许多相似之处.不同的是近场微波显微镜的工作频率正好处在高速半导体芯片和光通信中高频光调制器的工作波段,因而倍受工业界的重视.此外,近场光学显微术只适用于透明或半透明材料的研究,而近场微波显微术则适用于包括介电材料、铁电材料、导体、半导体、超导体等

几乎所有类型的材料.

扫描近场微波显微镜的原型可以追溯到 60 年代或更早以前^[2],但当时人们并未意识到近场作用的存在.那时的近场微波显微镜大多采用中空的波导作为探针.为了满足分辨率的要求,波导的尺寸必须小于截止频率.微波以指数衰减的形式从波导中传向被测物体,因而能从波导中通过并与物体发生作用的场很弱,系统的灵敏度很差.为了减小衰减, Bryant^[3]使用了渐细的同轴电缆.早期明确提出近场微波显微概念的是 Fee 和 Chu(1997 年诺贝尔物理奖得主朱棣文)等^[4],他们改用一中心导体尖化了的微同轴电缆为探针.由于同轴电缆没有截止频率,灵敏度有了较大的改善.但为满足分辨率而采用的小尺寸微同轴电缆或渐细同轴电缆的尖端还是有较强的衰减,灵敏度仍不够理想.此外,在他们的设计中,与物体作用的场还包含了较多的远场成分,背景信号较强,结果难以定量.此后,研究者们又在其基础上进行了许多改进,并在应用上取得了相当的进展^[5-8].

新型扫描近场微波显微镜的设计是在 1996 年提出的^[9],基本结构如图 1 所示.其核心部件是一个高品质因素(Q)的 $1/4$ 波长同轴共振腔.尖化后的探针则安装在共振腔开端的中心导体上,并从开端壁上的小孔中伸出共振腔约 2—3 mm.为了提高共振腔的品质因素和屏蔽远场成分,小孔用镶在腔壁上的镀有 Ag 膜的白宝石构成.白宝石上孔的大小应能容针尖穿过,越小越好;而镀层的厚度以 Ag 的趋肤深度为最佳.这样的设计既可有效地屏蔽远场成分,又可避免针尖与镀层间高损微同轴电缆的形成,以维持共振系统的高品质因素和灵敏度.大致说来,该系统的灵敏度比相应的同轴电缆法高 Q 倍,即提高了约 3—4 个量级,所以这是一次质的飞跃.针尖下方的样品通过与针尖的相互作用改变腔的有效长度和损耗,进而改变系统的共振频率和品质因素.通过压电片振动针尖,光电二极管探测针尖对激光的散射(或用其他方法),可将针尖与样品控制在 nm 或 μm 量级的恒定距离上.对绝缘材料,也可将样

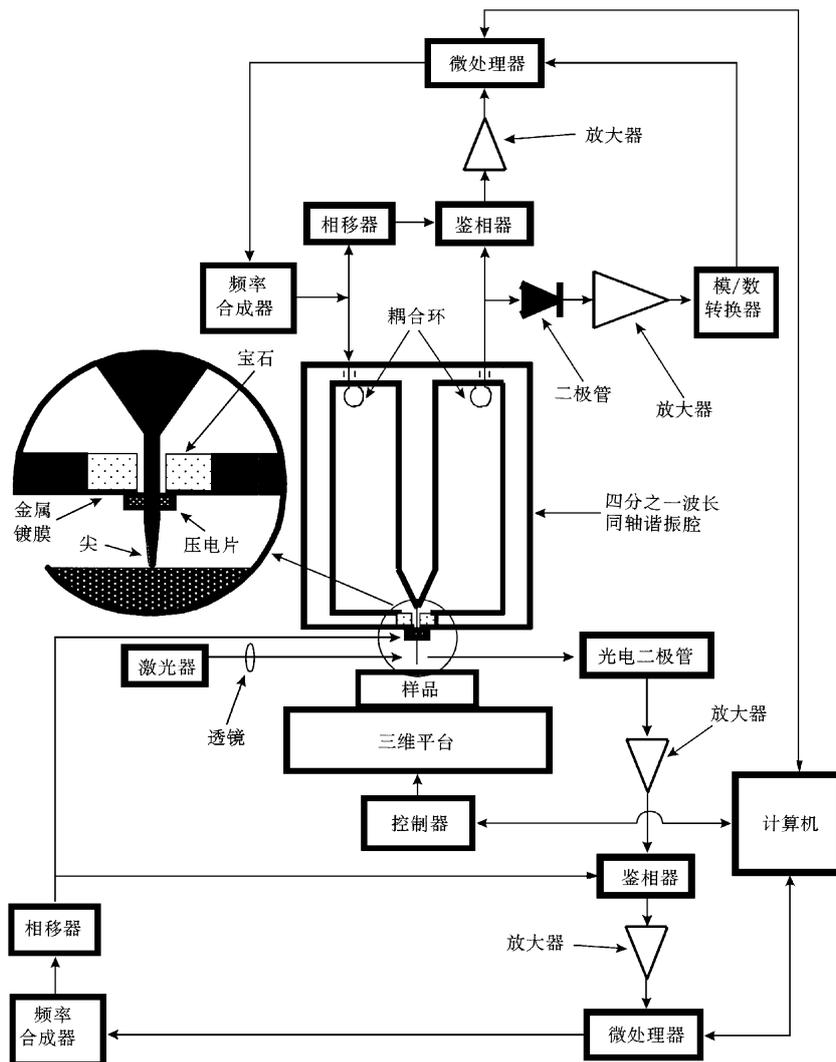


图1 扫描探针近场微波显微镜

品支撑在弹簧悬臂上,实现样品与针尖的软接触.共振系统通过闭端处的两个磁耦合环与外界相连.在扫描样品的同时,高速电子学系统通过鉴相器、比较器和放大器控制频率合成器,随时跟踪系统的共振频率,并由微波二极管检波、放大得到腔内的振幅,以确定系统的品质因素.同时记录三维平台上样品的位置和微波的响应,并通过一系列的理论计算可以再现介电性质、电导率的空间分布.

3 近场微波显微理论

由于近场显微术的基本思想是要将远小于

波长的“点”源或“点”探测器控制在离样品足够近的距离之内,在“点”源发出的波由于衍射而在扩散之前照明物体,或在载波中检测某个小区域的贡献,然而,由于源和物的距离或物和探测器的距离已经小于波长,它们之间不再是独立的,换句话说,在近场条件下,物体的存在势必会影响到源的发射,而探测器的存在也会干扰物体对波的散射,即它们已经形成一个不可分割的整体,这给相应的成像理论提出了挑战.基于以上的原因,在近场条件下,阿贝成像理论已失去了意义,取而代之的是必须在波长或更小的尺度上,根据实际的边界条件解麦克斯韦方程组,而其中所涉及到的隐失波又是传统波

物理

动理论中很少考虑的,这几乎不可避免地要依赖于计算机数值方法,给结果的定量化带来了一定的困难,也限制了近场显微术的广泛应用,所以,时至今日,近场光学显微术还没有令人满意的成像理论,对于系统的分辨能力、灵敏度也难以给出定量的预期。少量的一些工作也都是采用数值方法针对特定的情况进行的,结果不具有普适性。有人认为这正是为分辨率的提高所付出的代价。

在充分考虑了微波的特点后,我们针对新型探针扫描近场微波显微镜系统提出了一套“准静态”理论^[10]。现以介电材料软接触的情况为例说明如下:由于探针的设计,针尖可被近似为处在共振腔峰值电位上的金属微球。考虑到针尖场的作用范围(μm 量级)远小于微波波长(mm 或 cm 量级),作用范围内的位相差可以不予考虑,而作为一级近似,样品的损耗也可先行略去,因而适用“准静态”近似。当针尖附近没有样品时,等势的微球表面可用球心处的点电荷替代。在针尖电场的作用下,样品发生极化,而极化了的样品反过来作用于针尖,引起针尖上电荷的重新分布。无限重复这一过程可求出样品中的电场分布、系统的频移和 Q 值的改变。

根据求得的电场分布,可以计算系统的分辨能力和灵敏度。计算结果表明,系统的分辨能力与被测样品的介电常数有关,可比针尖的曲率半径小两个量级。造成这种现象的原因是极化了的样品对针尖上电荷的吸引,使得有效探测电荷进一步向尖端和样品靠拢,缩短了探测电荷与样品的距离,这一结论已被实验所证实^[11]。

4 应用举例

(1)用PMN薄膜验证系统的分辨率可达 100nm

PMN薄膜是一类重要的铁电功能材料。以曲率半径为 $10\mu\text{m}$ 的针尖,作者用上述新型扫描近场微波显微镜观察了白宝石衬底上(001)取向 $0.67(\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3) - 0.33\text{PbTiO}_3$ 薄

膜的介电性质,得到了分辨率为 100nm 、灵敏度达 6×10^{-4} 的图像^[11],证明了理论对分辨率的计算是正确的。

(2)高温超导薄膜

高温超导材料的重要应用之一是低噪声、高功率微波器件。由于高温超导材料的超导性对成分配比非常敏感,氧含量的微小变化也会造成超导转变温度的很大起伏。由薄膜沉积和刻蚀所形成的不均匀性,经常会引起电流的集中而造成非线性甚至局部区域的相变。研究这些不均匀性的形成和发展对高温超导薄膜材料的应用意义重大。Takeuchi^[12]等人用新型扫描近场微波显微镜研究了 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 薄膜,观察到了由刻蚀造成的边缘效应和由氧缺陷造成的不均匀超导相变;Thanawalla^[13]等人用微同轴电缆扫描近场微波显微镜也观察到了类似的现象。Steinhauer^[14]等人还将微同轴电缆扫描近场微波显微镜反过来使用,工作在被动模式下,测量了微波器件中实际的电场分布,用于指导设计和器件质量的检验。

(3) LiNbO_3 中的铁电畴

LiNbO_3 中的 180° 铁电畴没有光学反差,只能以差分侵蚀或其他破坏性的方法进行观察。Lu^[15]等人首次用新型扫描近场微波显微镜直接观察到了 LiNbO_3 单晶中 180° 的周期铁电畴和位错应力场引起的介电常数起伏。我们则定量研究了上述铁电畴的非线性^[16]。

(4)超高密度存储

信息存储是一种特殊的显微技术。任何新的显微术也都蕴涵着某种新的存储技术。目前使用的光盘采用的是远场技术,读写斑的尺寸被衍射极限控制在 $1\mu\text{m}$ 左右,存储密度约为 $50\text{MB}/\text{cm}^2$ 。若采用近场技术使读写斑的尺寸减小到 20nm ,则密度可提高到 $125\text{GB}/\text{cm}^2$ 。按此密度计算,一张 30cm 光盘的总容量可达 10^{14}bit ,相当于美国国会100年档案信息量的总和,接近人脑的总存储能力(10^{15}bit)。Betzig^[17]等人采用近场光学显微术,结合多层膜磁畴的磁光效应,成功地演示了这种可能,使读写斑的尺寸减小到 60nm ,存储密度达到了

7 GB/cm². 近场微波显微术结合铁电薄膜铁电畴的非线性可能具有更大的优势. 原因是铁电畴的畴壁比磁畴壁更窄, 潜在的存储密度更高. 但目前这方面的工作还未开展.

参 考 文 献

[1] Syngé E H. *Phil. Mag.*, 1928, 6:356—362
 [2] Soohoo R F. *J. Appl. Phys.*, 1962, 33(3):1276—1277
 [3] Bryant C A, Gunn J B. *Rev. Sci. Instrum.*, 1965, 36(11):1614—1617
 [4] Fee M, Chu S, Hänsch T W. *Opt. Commun.*, 1989, 69(3,4):219—224
 [5] Tabib-Azar M, Shoemaker N S, Harris S. *Meas. Sci. Tech.*, 1993, 4:583—590
 [6] Golosovsky M, Davidov D. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 68(11):1579—1581
 [7] Vlahacos C P, Black R C, Anlage S M *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 69(21):3272—3274

[8] Knoll B, Keilmann F, Kramer A *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1997, 70(20):2667—2669
 [9] Wei T, Xiang X D, Wallace - Freedman W G *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1996, 68(24):3506—3508
 [10] Gao C, Xiang X D. *Rev. Sci. Instrum.*, 1998, 69(11):3846—3851
 [11] Gao C, Wei T, Duewer F *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1997, 71(13):1872—1874
 [12] Takeuchi I, Wei T, Duewer F *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1997, 71(14):2026—2028
 [13] Thanawalla A S, Dutta S K, Vlahacos C P *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 73(17):2491—2493
 [14] Steinhauer D E, Vlahacos C P, Dutta S K *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1997, 71(12):1736—1738
 [15] Ly Y, Wei T, Duewer F *et al.* *Science*, 1997, 276(5321):2004—2006
 [16] Gao C, Duewer F, Lu Y *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1997, 73(8):1146—1148
 [17] Betzig E, Trautman J K, Wolfe R *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 1992, 61(2):142—144

1999 年第 11 期《物理》内容预告

庆祝建国 50 周年(III)

我国同步辐射发展应用现状(冼鼎昌);
 我国光物理研究进展(杨国桢);
 我国大气物理研究进展(吕达仁);
 50 年来的中国电离层物理研究(萧佐).

研究快讯

金属薄膜中磁性交换耦合的量子阱效应机制研究新进展(张志东).

知识和进展

石墨的非还原热离子发射特性的发现与研究进展(肖应凯);
 发现和优化新材料的集成材料芯片方法(高琛等).

物理学和经济建设

太阳能电池发展现状与我国阳光发电规划(魏光普);
 拉曼微区分析技术在古颜料研究中的应用(左健等).

实验技术

导电原子力显微镜及其应用(郭云等).

讲 座

21 世纪的光学和光电子学讲座第一讲 激光化学——
 化学物理中的一个新研究领域(马兴孝).

前沿和动态

纳米碳管中的 Aharonov - Bohm 振荡(戴闻);
 测量高温超导体中的动态位相刚度(戴闻).